

MODELIZACION PARA EL CÁLCULO DE VELOCIDADES DE ACARREO DEL AIRE EN EL TRANSPORTE DE GRANOS DE SOJA

M. Mattara¹, R. Ponso¹, M. Medina².

¹ Escuela de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Universidad Nacional de Rosario. Berutti 2109. 2000 Rosario. gemini@fceia.unr.edu.ar

² Consejo de Investigaciones. Escuela de Formación Básica. Fac. de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura.
Universidad Nacional de Rosario. Pellegrini 250. S2000FKO Rosario. mmedina@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN: El transporte neumático es ampliamente utilizado en instalaciones y maquinarias de transporte de granos. En este trabajo se muestra una metodología de simulación de velocidades de aire en el transporte neumático de granos en fase diluida o fluida. Se obtienen numéricamente velocidades de sustentación y de arrastre necesarias en el diseño de transporte neumático que pueden dar lugar a diseños con ahorro de energía. La velocidad de sustentación es necesaria para el transporte vertical y la de arrastre para tramos de transporte horizontal. El cálculo se realiza mediante la modelización del flujo de aire en conductos utilizando un software de elementos finitos que permite calcular velocidades y presiones actuantes sobre los granos de soja.

Palabras clave: transporte neumático, fase diluida, simulación numérica, soja.

INTRODUCCIÓN

El transporte neumático es ampliamente usado en el transporte de partículas a granel tanto en la industria química como en instalaciones y maquinarias de transporte de granos. Este método es respetuoso del medio ambiente, ideal cuando hay espacios reducidos, flexible y puede ser totalmente automatizado. Pero también puede llevar a altos consumos de energía, desgaste, abrasión, bloqueo y degradación de partículas, en particular en el transporte de granos donde debe preservarse la integridad de estos. Actualmente los diseños de las instalaciones y equipos se realizan en forma empírica, por lo que un adecuado entendimiento de los fenómenos involucrados puede ayudar a optimizar el diseño y la operación.

En el transporte neumático de granos, cuando existen velocidades relativas entre el grano y el aire circundante, una fuerza de arrastre es ejercida sobre el grano por el aire. Si el aire y el grano poseen una velocidad vertical hacia arriba, la fuerza de arrastre actuante sobre la partícula supera la fuerza del peso. Cuando la fuerza de arrastre está en equilibrio con la fuerza gravitacional, la velocidad del aire es llamada velocidad de sustentación. Un ligero incremento en esta velocidad de aire tendrá como consecuencia el movimiento hacia arriba del grano.

La velocidad de sustentación y el coeficiente de arrastre son las características más importantes para el diseño de los equipos de limpieza, manipuleo, aireación, almacenado y procesamiento de los granos con instalaciones neumáticas. Estas instalaciones tienen la ventaja de la simplicidad de sus elementos por un lado y por otro minimizan el daño en el grano si son correctamente diseñadas.

En particular la velocidad de sustentación es utilizada para el cálculo de la velocidad de los granos en conductos verticales (Raheman y Jindal, 2001). En la bibliografía existente se encuentran trabajos de índole experimental para la determinación de esta velocidad como por ejemplo el trabajo de Raheman y Jindal (2003) en arroz; Raheman y Jindal, 2001 en soja y arroz; Fernando y Hanna (2005) en soja; Kilickan and Güner (2006) en semillas de algodón y Güner (2007) en trigo, cebada, girasol y lentejas.

En cuanto a los trabajos de modelización y simulación numérica relacionados con las velocidades de sustentación y arrastre podemos citar algunos modelos matemáticos de los últimos años que fueron propuestos por Vu-Quoc et al (2000) donde analiza el transporte de partículas elipsoidales en conductos de forma de paralelepípedo y Gorham y Salman (2005) que estudia el acarreo neumático en conductos horizontales de partículas esféricas.

Sin embargo, los trabajos existentes no proporcionan suficientes elementos como para determinar las fuerzas de empuje actuando sobre los granos en general. En este punto es que surge la necesidad de desarrollar nuevas herramientas de análisis y cálculo con el objetivo de determinar velocidades de arrastre. La disponibilidad de estos programas podrá ser utilizada como una herramienta en desarrollos tecnológicos que tengan como premisas tanto la disminución del costo de energía utilizada y de los costos generales como la minimización del daño por impacto en los granos transportados.

Objetivo

El objetivo de este trabajo es mostrar una metodología de simulación de velocidades de aire en el transporte neumático de granos en fase diluida o fluida. Este método permitiría encontrar velocidades de sustentación y de arrastre necesarias en el diseño de transporte neumático dando lugar a diseños con ahorro de energía. La velocidad de sustentación es necesaria para

el transporte vertical y la de arrastre para tramos de transporte horizontal. Para transportes neumáticos de grandes caudales másicos, la velocidad del aire utilizada se multiplica por coeficientes de orden 2 o 3. En cambio para transporte de semillas en máquinas sembradoras es necesario contar con valores ajustados para un diseño correcto de los conductos y más aún, para el cálculo de la trayectoria de la semilla en función de garantizar la distancia entre semilla y semilla en el surco.

En particular, se obtienen por simulación las velocidades de sustentación de un grano de soja, de un conjunto de granos y la velocidad de arrastre de granos de soja en conductos. Entendemos por velocidad de arrastre la velocidad del aire que hará mover el grano desde una posición en reposo en un caño horizontal. Se muestran ejemplos de cálculos realizados para una determinada variedad de soja con una humedad en base seca de 5 %.

MODELIZACIÓN

Para encontrar la velocidad de sustentación de un grano de soja se considera el caso de un flujo vertical con velocidad constante en un conducto ideal de sección circular de 0.10 m de diámetro por 0.40 m de altura. El grano se coloca a 0.10 m de la base de ese conducto, coincidiendo su baricentro con el eje de simetría del mismo (Figura1). El grano de soja es considerado un elipsoide de revolución siendo el valor promedio de sus tres semiejes 0,0027 m, 0,0027 m y 0,0033 m (Deshpande et al, 1993) y se toma como densidad del mismo 1200 kg/m³. De acuerdo con un trabajo anterior (Medina et al, 2007 a), se sabe que la mayor velocidad de sustentación se obtiene cuando el ángulo θ formado por el eje mayor del elipsoide con la horizontal es de 90 °.

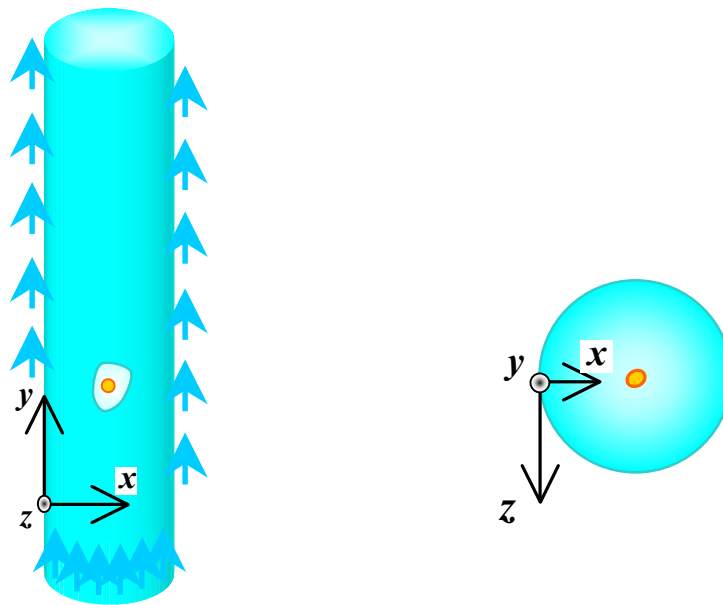


Figura 1: Axonometría y planta del sistema grano conducto considerado.

Para hallar la fuerza resultante actuante sobre el grano se deben conocer las tensiones sobre su superficie. La modelización del flujo de aire proporcionará el campo de velocidades y tensiones, luego a través de un programa desarrollado en Matlab se calcula la fuerza de sustentación mediante la integración numérica de las tensiones. Si la resultante es menor que el peso del grano se deberá incrementar la velocidad de ingreso del aire hasta que se supere el peso propio. Como condiciones de contorno para el cálculo del flujo se adoptan presiones en los extremos del tubo y velocidad cero en la frontera del grano. Para el cálculo de la fuerza que actúa sobre los granos se desarrolló un algoritmo especial donde se consideran condiciones de contorno tanto en tensiones como en velocidades (Mattara, 2009; Medina et al, 2007 b).

Para hallar la velocidad de arrastre se simula el flujo de aire en un conducto horizontal, con diferentes diámetros. De esta simulación se obtienen los campos de velocidades y presiones. Análogamente al caso anterior se obtiene el empuje sobre el grano a través de la integración sobre la superficie. Para que el grano se mueva el empuje debe ser superior a la fuerza de rozamiento estático, obtenida del producto entre el peso y el coeficiente de rozamiento.

Modelización del flujo de aire

El flujo de aire en un conducto es calculado utilizando un modelo tridimensional. Se plantean las ecuaciones de Navier-Stokes resueltas con una técnica de Reynolds Average Navier-Stokes (RANS) standard, con un modelo de turbulencia k- ϵ (Wilcox, 1998), siendo el número de Reynolds en el flujo de alrededor de 35.000. El algoritmo es estacionario y se resuelve con el software de elementos finitos Comsol. Las ecuaciones son las siguientes:

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

Ecuación promediada de Reynolds - Navier Stokes:

$$\rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [2\mu S_{ij} - \tau_{ij}] \quad (2)$$

Donde

U_i - velocidad media en la dirección de x_i .

ρ - densidad

P - presión media

μ - viscosidad dinámica

Tensor de tensiones medio

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

Tensión de tensiones de Reynolds

$$\tau_{ij} = 2\mu_T S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (4)$$

Viscosidad turbulenta

$$\mu_T = \rho c_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

Ecuación para la energía cinética turbulenta k

$$\rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (6)$$

Ecuación para la tasa de disipación de energía ϵ

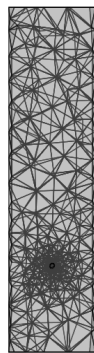
$$\rho U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \quad (7)$$

Donde

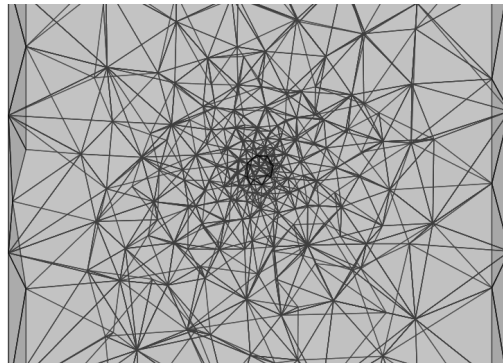
$$C_{\epsilon 1} = 1.44, \quad C_{\epsilon 2} = 1.92, \quad C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3 \quad (8)$$

Las condiciones de contorno son velocidades constantes en la frontera inferior del tubo (ver Figura 1). En las paredes laterales y sobre el grano se considera que el flujo normal es nulo.

Se utilizaron elementos tetraédricos de segundo orden en velocidades y de primer orden en presiones, con mallas refinadas en la proximidad del grano. Posiblemente con una malla más refinada se obtendrían mejores resultados, pero con este tipo de malla se está al límite de las capacidades computacionales. En la Figura 2 se muestra al menos una capa de elementos de la malla tridimensional utilizada.



(a)



(b)

Figura 2: a) Malla tridimensional del conducto vertical. b) Refinamiento en la zona del grano de soja.

Las características del aire utilizadas para el cálculo son densidad $\rho = 1.17 \text{ kg/m}^3$ y viscosidad dinámica $\mu = 1.983 \cdot 10^{-5} \text{ kg/ms}$. Como resultado de esta modelización se obtiene el campo de velocidades y presiones. Las presiones sobre el grano se utilizarán para obtener el empuje.

Modelización del grano de soja

Se considera el grano como un cuerpo rígido para poder considerar los gradientes de presiones que producen el empuje vertical. El cálculo se realiza solamente con las presiones porque la componente de la fuerza viscosa del aire se considera despreciable. Para el cálculo de la fuerza de sustentación, se modelizó la frontera de la misma con elementos de superficie de 3 lados. Se definieron en total 338 nodos y 224 elementos de superficie, ver Figura 3.

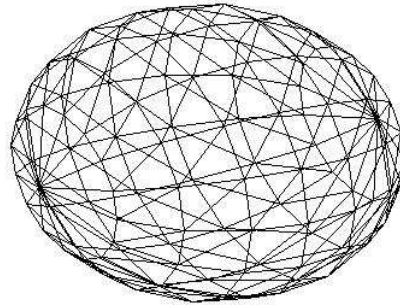


Figura 3. Malla sobre el grano de soja (*Glycine max L*).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mediante el uso del programa Comsol de elementos finitos se determinan las velocidades y las presiones actuando sobre el grano, que permiten calcular la fuerza de sustentación o de arrastre mediante un estudio dinámico.

Los resultados de las simulaciones de las velocidades de sustentación se obtienen colocando el o los granos en un conducto vertical, con un flujo de aire de velocidad contraria a la gravedad. Los granos están dispuestos en forma aleatoria en un volumen de un 0.001 m^3 sumergidos en un conducto mayor. En la Figura 4 se muestran los campos de módulo de velocidades y de presiones en el caso de un grano aislado donde está en equilibrio el peso propio y el empuje del aire. En la Figura 5 se muestra el campo de velocidades de un conjunto de 15 semillas en equilibrio en una corriente de aire. Se calcula también la velocidad de aire necesaria para el caso de que una semilla se encuentre sobre otra, aunque se considera que es una situación inestable debido a que con una perturbación las semillas se separan. Los resultados de las simulaciones se resumen en la Tabla 1.

Se pueden comparar los valores obtenidos con los existentes en la bibliografía. En el trabajo de Fernando and Hanna (2005) se determina experimentalmente el valor de la velocidad de sustentación para el diseño de un sistema de limpieza en la recolección de soja. Este valor se utiliza en una de las cámaras de limpieza para mantener los granos de soja en sustentación, mientras que las impurezas (otros materiales cosechados que no son granos) son arrastrados por el flujo de aire. Los resultados de los experimentos de laboratorio mostraron que la velocidad de sustentación promedio de los granos de soja es de 9.91 m/s , mientras que la velocidad de arrastre de diseño fue de 18.6 m/s .

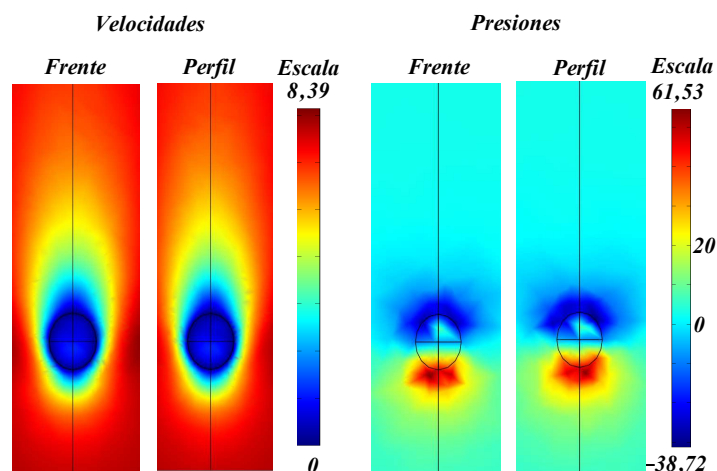


Figura 4: Módulo de velocidades $[\text{m/s}]$ y presiones $[\text{Pa}]$ alrededor del grano.

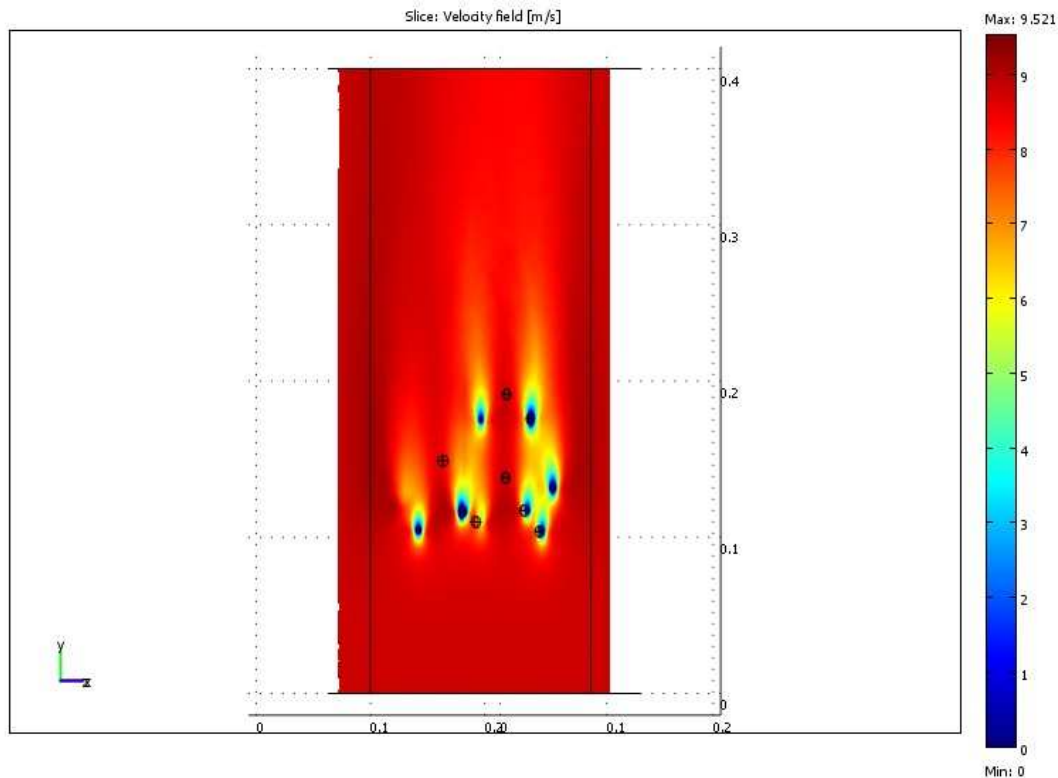


Figura 5: Módulo de velocidades de un conjunto de 15 granos de soja en un conducto vertical inmóviles en equilibrio, sostenidas por el empuje del flujo de aire.

	Grano de soja aislado	Tres granos de soja	Nueve granos de soja	Quince granos de soja	Dos granos superpuestos
Masa de grano / Masa de aire	0.16	0.48	1.46	2.42	0.32
Velocidad media de sustentación [m/s]	8.2	8.58	8.8	8.8	15.61

Tabla 1. Velocidades de sustentación en conductos verticales calculadas numéricamente.

En maquinarias agrícolas como sembradoras es común el uso de conductos de caucho para transportar neumáticamente las semillas. Esto motivó tratar de encontrar la velocidad de arrastre en tubos corrugados de caucho, por ello se comenzó modelizando los caños corrugados que se usan habitualmente en el transporte neumático, llegando a la conclusión que el espacio correspondiente al corrugado es suficientemente pequeño como para no afectar el flujo de aire. En consecuencia se modelizaron caños circulares lisos y se utilizó el coeficiente de rozamiento de 0.52 correspondiente a un conducto de caucho (Kashaninejad et al, 2008). La velocidad de arrastre encontrada corresponde al equilibrio entre el empuje del aire y la fuerza de rozamiento estática. Al superar esta velocidad el grano es arrastrado por el conducto. En la Figura 6 se muestra el campo de módulos de velocidades en un conducto de diámetro 0.015 m y en la Figura 7 lo mismo para un conducto de 0.035 m. En las figuras los colores azules corresponden a las velocidades mínimas y los rojos a las velocidades máximas. En la Tabla 2 se resumen los cálculos realizados para diferentes diámetros de conductos. Se observa un aumento de la velocidad de arrastre con el aumento de diámetro. Este fenómeno es debido, entre otras cosas, a que el grano se ubica en una zona de menor velocidad lo que se traduce en menor presión de empuje cuanto más grande es el diámetro del conducto. Las simulaciones han sido realizadas en conductos horizontales.

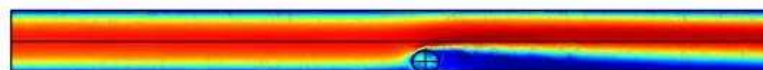


Figura 6: Campo de velocidades en un conducto horizontal de diámetro 0.015 m. La velocidad media del aire es 9.89 m/s.

Los resultados de las velocidades se encontrarán afectados por la variedad de grano y por el contenido de humedad, ya que los coeficientes de rozamiento varían con estos parámetros (Kashaninejad et al, 2008). En el caso de la velocidad de arrastre, se debe tener en cuenta el material del conducto, porque variará el coeficiente de rozamiento. De allí la necesidad de hacer para cada situación un cálculo de la velocidad de sustentación o de arrastre.

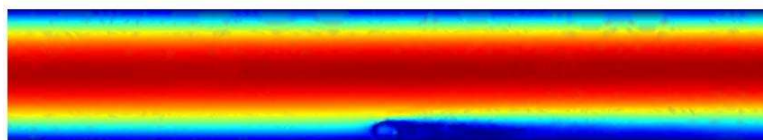


Figura 7: Campo de velocidades en un conducto horizontal de diámetro 0.035 m. La velocidad media del aire es 21.42 m/s.

Diámetro de la cañería [m]	0.015	0.020	0.025	0.030	0.035	0.050
Velocidad media del aire [m/s]	9.89	12.61	14.19	16.43	21.42	27.09

Tabla 2: Velocidades de arrastre en tubos horizontales calculadas numéricamente

CONCLUSIONES

En este trabajo se han realizado simulaciones de velocidades de aire de sustentación y arrastre en tubos horizontales para granos de soja que son de utilidad en el dimensionamiento de instalaciones neumáticas de transporte. En el caso de máquinas como sembradoras, esta metodología permitirá calcular la velocidad de aire en las tuberías que conectan los componentes como ser distribuidor, dosificadores, etc., y en consecuencia la potencia de las turbinas, optimizando el gasto de energía. Esta una metodología puede extenderse para otros granos. Cada situación en cuanto a variedad de grano, contenido de humedad, material del conducto (en el caso de velocidad de arrastre) se debe tener en cuenta en la obtención de las velocidades. Es necesaria una validación experimental de los resultados obtenidos.

AGRADECIMIENTOS:

Este trabajo ha sido realizado dentro del marco del proyecto PID SECYT UNR IING287 “Optimización del diseño en maquinarias e instalaciones agrícolas orientado a la manipulación de granos” al cual pertenecen los autores.

REFERENCIAS

- Deshpande, S. D., Bal, S., Ojha, T.P. (1993). Physical Properties of Soybean. J. agric. Engng Res. 56, 89-98.
- Fernando, S. D., Hanna M. A., Design and Development of a Threshing Chamber and Pneumatic Conveying and Cleaning Units for Soybean Harvesting (2005). Transactions of the ASAE, American Society of Agricultural and Biological Engineers. Vol. 48(5): 1681–1688.
- Gorham D.A., Salman A. D. (2005). The failure of spherical particle under impact. Wear 580-587.
- Güner, M. (2007). Pneumatic conveying characteristics of some agricultural seeds. Journal of Food Engineering 80 904–913.
- Kashaninejad M., Ahmadi M, Daraei A., Chabra, D.(2008) Handling and frictional characteristics of soybean as a function of moisture content and variety. Powder Technology 188, 1–8
- Kilickan, A.; Güner, M. (2006). Pneumatic Conveying Characteristics of Cotton Seeds. Biosystems Engineering 95 (4), 537–546. doi:10.1016/j.biosystemseng.2006.08.015.
- Mattara, M. (2009). Determinación de la trayectoria del grano de soja (*Glycine max L.*) en conductos. Tesis de Doctorado en Ingeniería. U.N:R.
- Medina, M, Mattara, M, Ponso, R.(2007 a). Determinación numérica de la velocidad de sustentación de un grano de soja en un conducto vertical. Mec. Comp., Vol. XXVI, ISSN 1666-6070 S. Elaskar, E. Pilotta, G. Torres (Eds), Arg., 1120-1130.
- Medina M, Mattara M, Ponso R (2007 b), Simulación numérica de la trayectoria de un grano de soja en un conducto.: Mec. Computacional, Vol. XXVI, ISSN 1666-6070 S. Elaskar, E. Pilotta, G. Torres (Eds), Argentina, 1143-1157.
- Raheman, H., Jindal, V. K. (2001). Solid Velocity Estimation in Vertical Pneumatic Conveying of Agricultural Grains. Applied Engineering in Agriculture. Vol. 17(2): 209–214. American Society of Agricultural Engineers.
- Raheman, H., Jindal, V. K., Drag. (2003) Coefficients Of Agricultural Grains In Vertical Pneumatic Conveying. Applied Engineering in Agricultura. Vol. 19(2): 197–202. American Society of Agricultural Engineers.
- Vu-Quoc L., Zhang X., Walton O.R. (2000). A 3-D discrete-element method for dry granular flows of ellipsoidal particles. Comput. Methods Appl. Mach. Eng., 187, 483-528.
- Wilcox, D. C.(1998). Turbulence Modeling for CFD. DCW Industries Inc..

ABSTRACT

Pneumatic transport is widely used in grain transport machinery. In the present work it has been developed a methodology of an air flow simulation in the pneumatic grain conveying, in both dilute-phase and fluid phases. Terminal and saltation velocities, necessary for the pneumatic conveying design, are numerically obtained, which might lead to energy-saving designs. The terminal velocity is necessary for the vertical transport, and the saltation velocity for horizontal conveying lengths. The calculus is carried out through air flow modeling in conduits, by finite-elements software that calculates velocities and pressures acting over the soybean grains.

Keywords: pneumatic conveying, dilute-phase, numerical simulation, soybean.